干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.05.18

2000—2015 年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系①

张斯琦[1]， 陈 辉[1]， 宋明华[2]， 付 阳[1]， 牛慧慧[1]， 杨 祎[1]， 张博雄[1]

（1 河北师范大学资源与环境科学学院，河北省环境演变与生态建设实验室，河北 石家庄 050024；
2 中国科学院地理科学与资源研究所，生态系统网络观测与模拟重点实验室，北京 100101）

摘 要： 基于 MODIS-*NDVI*、*DEM* 和气象数据，分析柴达木盆地 2000—2015 年植被覆盖度（*FVC*）时空变化特征，并与降水、温度、日照时数、相对湿度、蒸散量和海拔进行相关、偏相关或叠加分析，探讨 *FVC* 与各环境因子的关系。结果表明：*FVC* 整体自东南向西北内陆呈半环状递减，*FVC* 集中在 20% 以下，人类活动及径流等打破植被地带性规律；2000—2015 年 *FVC* 明显改善，广泛分布于盆地中西部地区，2001—2002 年年际变化最显著；*FVC* 与降水、相对湿度以正相关为主，与温度关系不显著，与日照时数和蒸散量主要为负相关，降水对 *FVC* 贡献最大，温度通过影响蒸散量等间接影响 *FVC*，而土壤蒸发对蒸散量的影响大于植物蒸腾；*FVC* 与等高线空间分布较吻合，*FVC* 在 2 800～2 900 m和 4 600～4 700 m 出现两个峰值，4 700 m 以上 *FVC* 迅速降低。

关 键 词： 植被覆盖度； 年际变化； 环境因子； 相关分析

气候变化对植被结构和功能的影响是全球变化与陆地生态系统（GCTE）研究的重要内容，受到国内外学者高度重视[1]。植被作为生态系统最活跃因素之一，对地表能量交换过程、生物地球化学循环过程和碳循环过程起重要作用[2]，是气候变化的指示器。植被覆盖度（fractional vegetation cover，*FVC*）是衡量植被变化的重要指标，一定程度上反映植被生长状态和结构[3]，特别在全球气候变暖背景下，环境因子的变化必然在植被覆盖方面有所响应，继而为植被—气候变化交互过程研究和生态环境治理提供重要依据。*FVC* 与气候的关系已成为当前全球变化研究的重点[4]。

遥感具有时效性强、覆盖范围广等特点[5]，是 *FVC* 获取的主要手段。*NDVI* 能够较好的反映植被生长状况，广泛用于植被与气候关系研究[6－7]，主要包括 *FVC* 时空分布及其对温度和降水的响应[8－9]。徐兴奎等[10]根据 NOAA-AVHRR 的 *NDVI* 数据分析青藏高原 *FVC* 时空变化特征，揭示温度升高对高原北部 *FVC* 退化影响更为突出；穆少杰等[1]通过 MODIS-*NDVI* 数据研究表明 2001—2010 年内蒙古 *FVC* 整体呈上升趋势，且与降雨量相关性更高；张戈丽等[4]基于 GIMMS-*NDVI* 数据从不同时段对呼伦贝尔草地与气候进行研究，结果显示年际尺度草原覆盖与降水关系更为密切，而 5 月受温度影响更大。由于数据、尺度等原因，不同学者对 *FVC* 与温度和降水关系的观点不同。

柴达木盆地位于青藏高原北部，地处季风区和西风区的过渡地带[6]，生态环境脆弱。高寒干旱的气候和复杂的地形使盆地内分布高山裸岩、戈壁荒漠等景观，人类活动影响较小，是研究自然状态下植被与环境因子关系较为理想区域。柴达木盆地也是全球气候变化最敏感的区域之一[11]，盆地内 *FVC* 变化能综合反映区域甚至全国气候与环境变化。目前有关柴达木盆地 *FVC* 及其与环境因子关系研究较少，多数集中于对青藏高原 *FVC* 的相关研究[12－13]，盆地内部植被覆盖细节特征在以往研究中

① **收稿日期：** 2018－06－01； **修订日期：** 2018－12－27
基金项目： 国家自然科学基金面上项目（40971118；41671263）
作者简介： 张斯琦（1993－），女，硕士研究生，研究方向为综合自然地理学．E-mail：zhangsq0511@163.com
通讯作者： 陈辉（1972－），女，博士，教授，研究方向为综合自然地理学．E-mail：chenhui@igsnrr.ac.cn

常被忽略,同一地区 *FVC* 变化尚有较大争议[10,14-15]。因此,阐明柴达木盆地 *FVC* 和环境因子的关系对于干旱半干旱地区生态系统研究有重要意义。

柴达木盆地植被覆盖变化及其对温度和降水响应的研究结论不一[4,8-10,14]。此外,*FVC* 与地形、日照时数等多种因素有关。基于此,本文选取 2000—2015 年 MODIS-*NDVI* 数据,结合同期周边 35 个站点气象数据和 *DEM* 数据,揭示柴达木盆地 *FVC* 时空分布特征及其与降水、温度、相对湿度、日照时数、蒸散量和海拔的关系,以期得到柴达木盆地 *FVC* 与多个环境因子更为详细的关系,为干旱区生态环境和气候变化研究提供一定参考。

1 研究区概况

柴达木盆地位于青海省西北部,是由阿尔金山脉、昆仑山脉和祁连山脉围绕的山间盆地[11](图 1)。盆地海拔 2 651 ~ 6 151 m,垂直分异明显。年降水量 15 ~ 200 mm,年均温在 5 ℃以下,相对湿度 30% ~ 40%,干旱少雨,蒸发旺盛,属典型的高原大陆性气候。盆地内河网密布,湖泊众多,有大哈勒腾河、那仁郭勒河、苏干湖等。柴达木盆地植被较为稀疏,植被结构简单,以具有高度抗旱能力的灌木、半灌木为主,主要植被类型有驼绒藜(*Ceratoides latens*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、合头草(*Sympegma regelii*)等。城镇主要分布在中部和东南绿洲区,其他区域人类活动稀少。

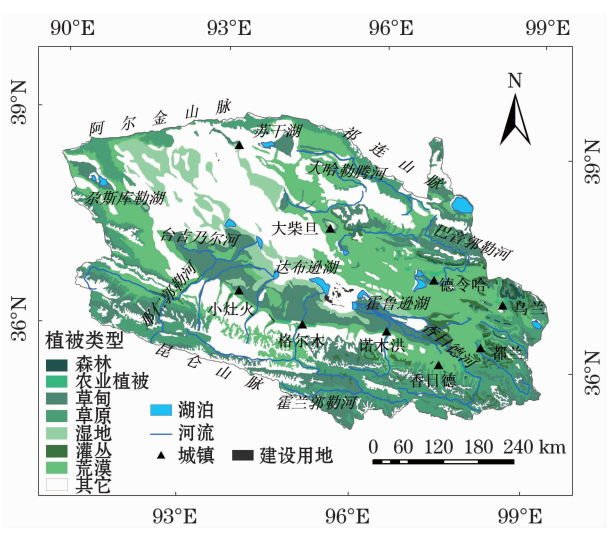


图 1 柴达木盆地位置和植被类型分布

Fig. 1 Location and vegetation type distribution in the Qaidam Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

遥感数据源于美国国家航空航天局(NASA)的 MODIS 数据。本文选取 2000—2015 年 5 ~ 9 月的 MODIS13Q1 产品,空间分辨率 250 m × 250 m,时间分辨率 16 d,该产品经过几何粗校正、大气校正等预处理,在此基础上,通过 MRT 对 MODIS-*NDVI* 进行拼接和重投影。MODIS 16 天合成产品会受到太阳高度角、气溶胶等因素影响,利用最大值合成法(MVC)对各月 *NDVI* 数据进行异常值处理,得到 2000—2015 年柴达木盆地生长季的 *NDVI* 数据。

气象数据采用中国气象科学数据共享服务网(data. cma. cn)2000—2015 年柴达木盆地及周边 35 个气象站点逐日数据集。对气象数据进行异常值处理,利用 Matlab-R2011b 计算 16 a 逐日蒸散量,对其进行累计统计,得到每个气象站点生长季的总蒸散量。根据 ArcGIS10.2 对气象数据进行 Kriging 插值处理,得到同期分辨率一致的降水、温度、相对湿度、日照时数和蒸散量的栅格气象数据。

植被类型数据为寒区旱区科学数据中心的 1∶1 000 000中国植被图(westdc. westgis. ac. cn),土地利用数据由中科院数据中心提供,包括林地、建筑用地等 6 类(图 1)。

数字高程数据采用地理空间数据云(www. gscloud. cn)STRM-90 m 的 DEM 数据,将该数据经拼接、投影变换,重采样为 250 m 分辨率 DEM 影像,得到柴达木盆地高程分布。

2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度的计算 像元分解模型法是间接估算 *FVC* 的一种常用方法,通常利用 *NDVI* 直接提取植被覆盖信息[16]。它假设像元由植被信息和裸土信息组成,即

$$NDVI = F_i \times NDVI_v + (1 - F_i) \times NDVI_s \quad (1)$$

$$F_i = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (2)$$

式中:F_i 为第 i 年的植被覆盖度;i 为年份;$NDVI_s$ 为裸土像元贡献的信息;$NDVI_v$ 为纯植被像元贡献的信息;*NDVI* 为像元植被覆盖部分和非植被覆盖部分的加权平均。

2.2.2 植被覆盖度变化趋势计算 对2000—2015年植被覆盖度进行一元线性回归分析，利用最小二乘法计算16 a柴达木盆地*FVC*的变化趋势，公式为：

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times F_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} F_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{3}$$

式中：b为拟合方程斜率；n为监测时段年数；F_i为第i年的植被覆盖度；i为年份。采用F检验对方程进行显著性检验，共分为极显著增加（$b>0, P<0.01$），显著增加（$b>0, 0.01 \leqslant P<0.05$），无显著变化（$P \geqslant 0.05$），显著减少（$b<0, 0.01 \leqslant P<0.05$）和极显著减少（$b<0, P<0.01$）5级。

2.2.3 蒸散量的计算 潜在蒸散量（ET_0）是假设作物高度为0.12 m，反照率和冠层阻力分别为0.23和70 s·m^{-1}的冠层蒸散，通常为土壤蒸发和植物蒸腾的总耗水量[17]，它在一定程度上综合反映植被覆盖状况及其与温度、海拔、日照时数等环境因子的复杂关系。联合国粮农组织（FAO）推荐的Penman-Monteith公式结合了水分循环与能量平衡，广泛适用于全球范围蒸散量的研究[18]，本文选用Penman-Monteith公式计算蒸散量，即：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u(e_s - e)}{\Delta + \gamma(1+0.34u)} \tag{4}$$

$$R_n = 0.77 \times \left(a + b\frac{n}{N}\right)R_{so} - R_{nl} \tag{5}$$

式中：Δ为饱和水气压—温度斜率（kPa·℃$^{-1}$）；R_n为植被表面净辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；G为土壤热通量（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；γ为干湿常数（kPa·℃$^{-1}$）；T为日均温（℃）；u为2 m高风速（m·s^{-1}）；e_s为饱和水气压（kPa）；e为实际水气压（kPa）；a、b为经验系数；n为实际日照时数（h）；N为最大可能日照时数（h）；R_{so}为晴天辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}）；R_{nl}为净长波辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}）。

模型中经验系数选取直接决定R_n的准确性，区域不同经验系数差异较大，FAO推荐的模型系数（$a=0.25, b=0.5$）并不适用于我国区域研究。本文选取校正的Penman-Monteith模型参数（$a=0.198, b=0.787$）用于蒸散量的计算[19]。

2.2.4 植被覆盖度与环境因子相关性计算 为研究*FVC*与各环境因子间关系的密切程度，运用相关分析对其进行定量描述，相关系数计算公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{6}$$

式中：r_{xy}为变量x、y的相关系数；x_i为第i年植被覆盖度；y_i为第i年环境因子；$\bar{x}$为16 a平均*FVC*；$\bar{y}$为16 a各环境因子的平均值。

*FVC*受多个因素综合影响。通常单独研究两个变量间的相互关系，暂不考虑第3个变量的影响，即利用偏相关系数进行分析：

$$r_{123} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2) + (1 - r_{23}^2)}} \tag{7}$$

式中：r_{123}为控制第3个变量时变量1和2的偏相关系数；r_{12}、r_{13}、r_{23}分别为1与2、1与3、2与3之间的相关系数，并利用t检验对其显著性进行检验。

3 结果与分析

3.1 柴达木盆地多年平均植被覆盖度空间分布

2000—2015年*FVC*整体呈现自东南向西北内陆呈半环状递减趋势，平均植被覆盖10.23%（图2）。其中4%区域*FVC*在5%以下，零星分布于昆仑山区和部分西北内陆地区，昆仑山顶常年积雪覆盖，高反射率影响了*FVC*反演效果。盆地东南低山区紫花针茅草原区、中部格尔木—诺木洪一带绿洲

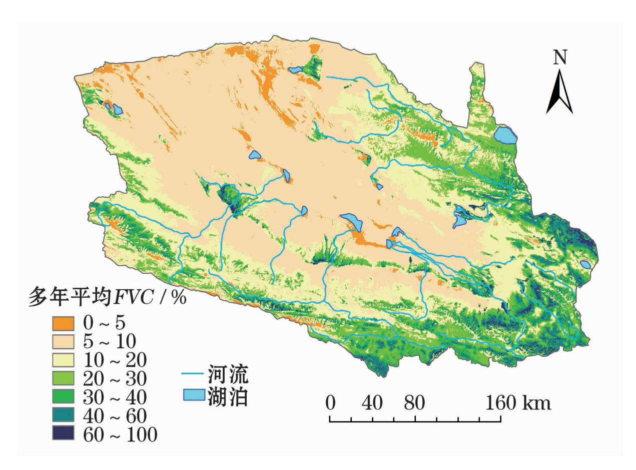


图2 2000—2015年柴达木盆地植被覆盖度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of fractional vegetation cover in the Qaidam Basin during 2000—2015

核心区前缘芦苇—野麻—柽柳草甸区、苏干湖东部冲积平原芦苇—赖草草甸区约 5.9% 区域 *FVC* 在 40% 以上,该区域湖泊和径流等水文条件较好,利于植被生长,打破了 *FVC* 地带性分布规律。昆仑山区、巴音郭勒河和霍兰郭勒河周边水源相对充足,*FVC* 多集中在 20% ~40% 。

3.2 柴达木盆地植被覆盖度年际变化

柴达木盆地 2000—2015 年年均 *FVC* 总体呈波动增长趋势,平均改善面积 21.25% (图 3a),森林、草原和草甸改善趋势较为明显(图 3b)。其中 2002—2006 年平均 *FVC* 持续增长,2001—2002 年增速最为显著,平均年际变化率达 0.15。格尔木—昆仑山脉之间山间平原、尕斯库勒湖和苏干湖以南的中西部地区以及乌兰周边祁连圆柏、嵩草草甸区 *FVC* 极显著增加,占区域面积 9.4% 。显著增加面积达 14% ,广泛分布在盆地中西部荒漠地区、东部山区及那仁郭勒河下游河谷地区。*FVC* 极显著减少和显著减少的区域分别为 1.06% 和 1.09% ,主要位于那仁郭勒河、台吉乃尔河之间芦苇草甸区,台吉乃尔湖等湖泊周边盐沼地区、香日德河芦苇—野麻—柽柳草甸区和沙蒿荒漠区以及霍兰郭勒河下游紫花针茅草原区。由于河湖沿岸冲积平原多城镇分布,人类活动较强,常被改造为盐场等建设用地,故 *FVC* 退化趋势明显。

ZHOU 等[20] 曾指出全球气候变暖背景下北半球中纬度植被活动增强,FANG 等[21] 发现我国大部分地区植被活动也在增强。本研究发现 2000—2015 年柴达木盆地 *FVC* 总体呈上升趋势,与前人研究结果一致,但是不同类型植被变化有较大差异,特别是 2013—2015 年荒漠和湿地等分布区 *FVC* 明显降低,主要受人类活动影响[22]。

3.3 柴达木盆地植被覆盖度与环境因子的关系

3.3.1 植被覆盖度与气象要素的关系 图 4a 显示 *FVC* 对降水量响应较为敏感,正相关面积达 18.87% ,主要分布在盆地东南山区、大柴旦—德令哈一线以北及尕斯库勒湖以南地区,其中 7.57% 极显著正相关区域集中在东南低山区,该区域临近印度洋水汽源地,生长季多在迎风坡形成降水,且海拔较低,温度对植被生长限制性较小,促进植被活动的增强。0.73% 的负相关区域位于中部绿洲核心区前缘,该地区多分布盐碱湿地,平坦的地形和相对密集的径流弥补了降水不足的缺陷[23],生长了茂密的盐生植被,负相关关系显著。

FVC 与温度关系并不明显(图 4b),仅 2.49% 的区域通过显著性检验,这与张学珍等[24] 的结论一致。*FVC* 与温度 1.3% 显著正相关区域零星分布在盆地南部和祁连山南部山区,主要植被类型为小嵩草和风毛菊,德令哈—都兰一线以东部分山前冲积平原温度较低,雨水多在此汇集,水分较为充足,使该地区 *FVC* 略高于其他荒漠地区,呈现显著负相关。罗玲等[8] 表明东北地区植被与温度的相关性明显高于降水。柴达木盆地是典型的干旱半干旱生态系统,降水是植被生长主要限制因子,与 *FVC* 相关性远高于温度,以致出现相反的结论。但大范围内 *FVC* 对温度的响应尚有待进一步研究。

FVC 与相对湿度 9.41% 区域关系显著(图 4c)。7.7% 的正相关区域分布在都兰—香日德一线以东低山区和昆仑山以北山间盆地,其中都兰以东紫花针茅草原地区相关性最为显著,与降水极显著正相关区域有较好重叠性。都兰以东低山区降水充足且温度较低,空气流动慢,蒸发相对较弱,相对湿度较高,植被覆盖高。中部绿洲核心区前缘近内

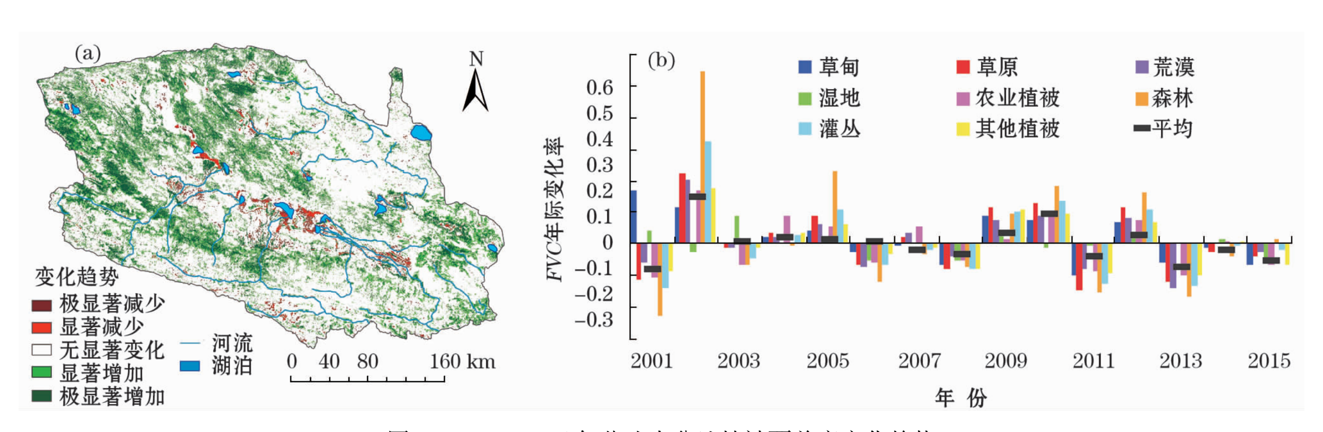


图 3 2000—2015 年柴达木盆地植被覆盖度变化趋势

Fig. 3 Change trend of fractional vegetation cover in the Qaidam Basin during 2000—2015

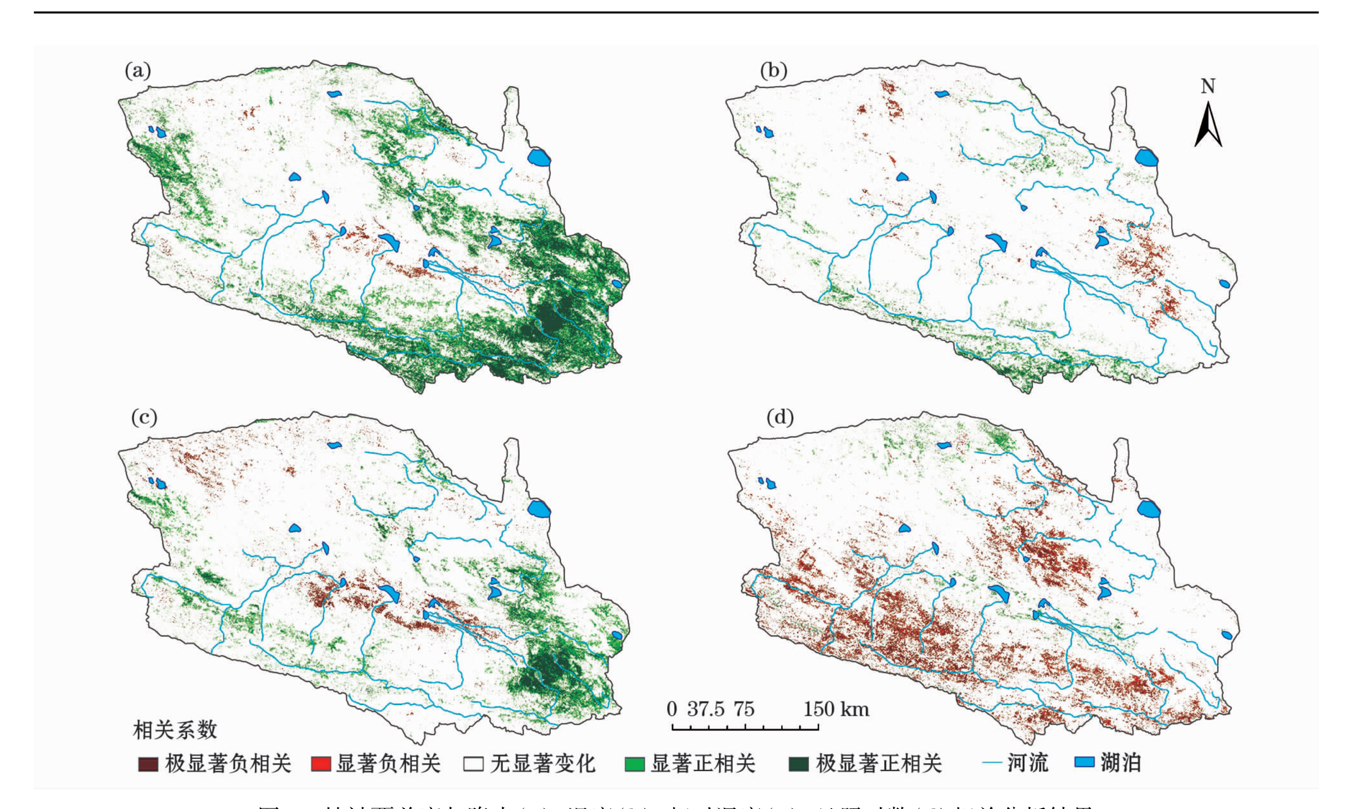


图 4　植被覆盖度与降水(a)、温度(b)、相对湿度(c)、日照时数(d)相关分析结果

Fig. 4　Correlation analysis between fractional vegetation cover and precipitation (a), temperature (b), relative humidity (c) and sunshine hours (d)

陆,相对湿度低,但该地区河湖众多,地下径流丰富,植被生长茂盛,且相比于其他内陆地区人类活动频繁,人工植被和农田分布集中,因此负相关关系显著。

格尔木—诺木洪以南、西南昆仑山区、大柴旦以东 7.81% 区域 *FVC* 与日照时数呈负相关(图 4d),其中 1.66% 为极显著负相关。负相关区域日照时数少,生长季多降水,植被较为茂盛。苏干湖—大哈勒腾河等区域周边 0.99% 区域呈正相关,该地区是柴达木盆地日照时数最为充足的地区,也是西北内陆水分相对充足的区域,与盆地内其他沙漠地区相比能够生长驼绒藜和芦苇等植被,正相关关系显著。

FVC 与主要气候因子关系差异较大(表1),其中显著相关区域面积为降水 > 相对湿度 > 日照时数 > 温度,即降水对盆地内 *FVC* 贡献高于其他因子,而温度对 *FVC* 直接贡献最小。但多种气候因子对 *FVC* 综合影响有待进一步探讨。

表 1　植被覆盖度与气候因子的相关区域面积百分比 / %

Tab. 1　Percentage of relevant areas of fractional vegetation cover and climatic factors　/ %

	降水	温度	相对湿度	日照时数
极显著负相关	0.09	0.16	0.39	1.66
显著负相关	0.64	1.03	1.32	6.25
显著正相关	11.30	0.85	5.25	0.85
极显著正相关	7.57	0.45	2.45	0.14

3.3.2　植被覆盖度与蒸散量的关系　蒸散量是土壤蒸发和植物蒸腾的综合反映,*FVC* 与蒸散量呈明显负相关关系(图 5),集中分布在大柴旦—德令哈以北森林草原区、都兰以东芨芨草草原区以及西南

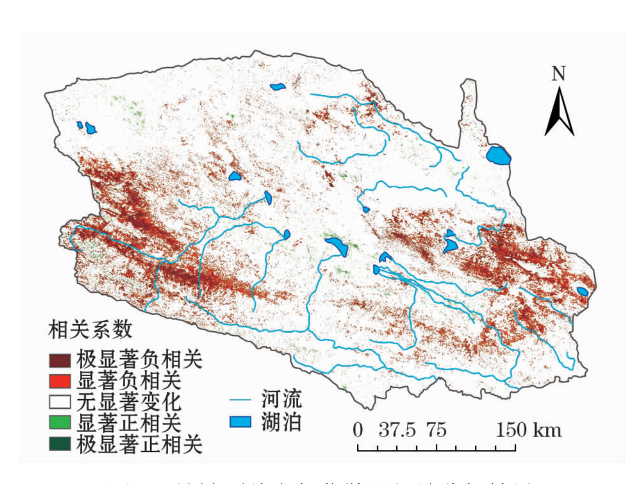


图 5　植被覆盖度与蒸散量相关分析结果

Fig. 5　Correlation analysis between fractional vegetation cover and evapotranspiration

昆仑山荒漠草原区等植被覆盖较高区域。一方面高植被覆盖区域地表温度较低且植物需水量大,消耗土壤水分多,降低了土壤蒸发;另一方面区域内分布的紫花针茅、猪毛菜等植被叶片多呈针状或丝状,叶片面积小,植物蒸腾作用较弱,总体蒸散量偏低,相对充足的降水使 *FVC* 较高,间接说明盆地内植物蒸腾小于土壤蒸发对蒸散量的影响,这与盆地中西部干旱少雨、降水集中在盆地外围山区的背景相一致。

温度和降水的变化必然影响土壤湿度、植被的变化。为了更清楚了解 *FVC* 与蒸散量的关系,选取温度、降水为代表性因子与 *FVC* 和蒸散量进行偏相关分析。控制降水和温度因子得到蒸散量与 *FVC* 显著性区域面积均有大幅提高,图 6a 中 *FVC* 与蒸散量 37.3% 区域通过显著性检验,图 6b 西南昆仑山区等 49.2% 的区域通过显著性检验,高于 *FVC* 与降水的显著性面积。温度、降水很大程度影响了蒸散量与 *FVC* 关系,其中温度对蒸散量的贡献大于降水,即温度可能通过影响蒸散量等因素而间接影响 *FVC*。

3.3.3 植被覆盖度与海拔的关系 柴达木盆地海拔从盆地周边向西北内陆递减,与 *FVC* 空间分布具有较好的一致性(图 7a)。*FVC* < 10% 区域与 3 500 m和 4 600 m 等高线基本吻合,多分布荒漠植被和湿地;海拔 3 500 ~ 4 000 m 区域内 *FVC* 集中在 10% ~ 20%,分布有驼绒藜、白刺等荒漠植被和芨芨草等草原;*FVC* > 20% 的区域海拔基本在 4 000 ~ 4 600 m,发育小嵩草、紫花针茅等高寒草原和草甸。海拔对 *FVC* 的分布有较大的影响,使植被具有明显垂直分异特性。*FVC* 与海拔也具有良好的线性关系(图 7b),2 800 ~ 2 900 m 和 4 600 ~ 4 700 m 处出现两个波峰。海拔在 2 800 ~ 2 900 m 盆地中部绿洲区由于河湖以及地下水出流等原因[6]多形成芦苇、白刺、大花野麻等非地带性植被。随着海拔升高,温度逐渐代替降水成为植被生长的主要限制因子,使

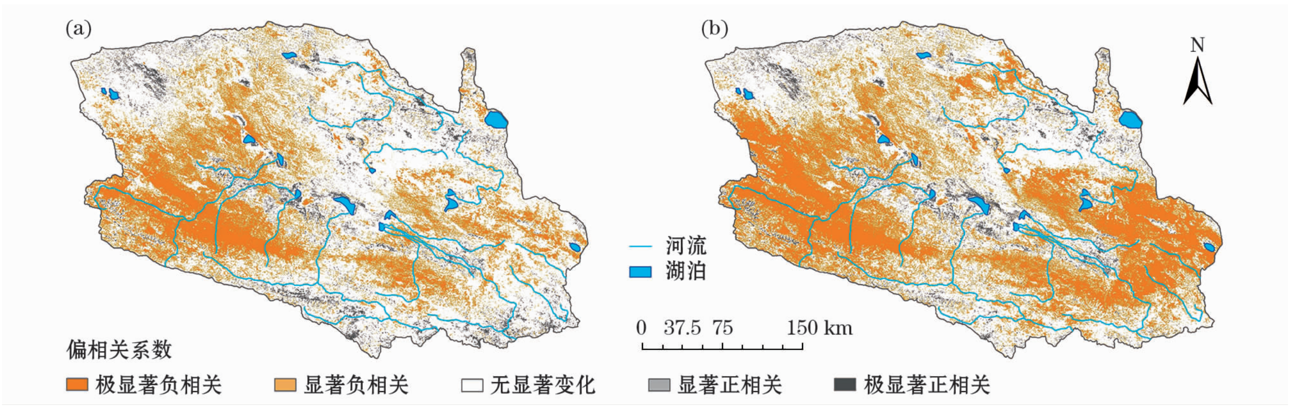


图 6 植被覆盖度、蒸散量与降水(a)和温度(b)的偏相关分析

Fig. 6 Partial correlation analysis of fractional vegetation cover, evapotranspiration, precipitation (a) and temperature (b)

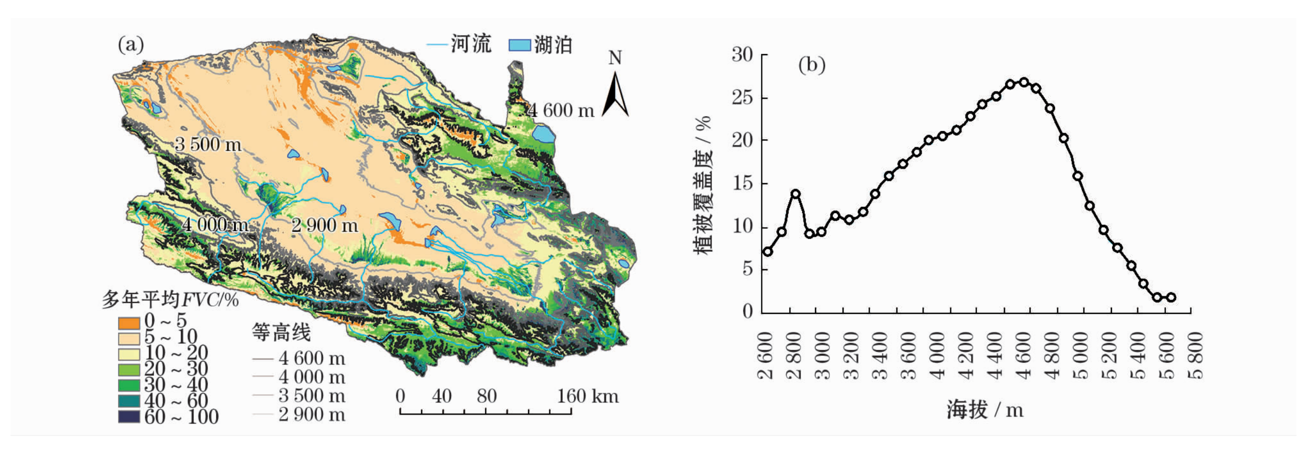


图 7 植被覆盖度(a)及其与海拔的关系(b)

Fig. 7 Vegetation cover (a) and its relationship with elevation (b)

FVC 在 4 700 m 以上迅速降低。此外,高海拔区域山顶分布多年积雪,也在一定程度上影响了 *FVC*。

4 结 论

(1) 柴达木盆地 *FVC* 总体自东南向西北内陆呈半环状递减趋势,平均植被覆盖 10%。高植被覆盖区域分布在盆地外围山区和中部绿洲地区,由于人类活动和地下水出流等因素影响,打破了植被地带性分布规律。

(2) 2000—2015 年柴达木盆地 *FVC* 呈波动上升趋势,其中 2002—2006 年 *FVC* 持续改善,格尔木—昆仑山脉之间山间平原、尕斯库勒湖和苏干湖以南的中西部地区以及乌兰周边区域植被极显著增加,盆地中西部荒漠、东部山区等区域改善趋势较为明显,人类活动频繁的河湖周边地区 *FVC* 呈下降趋势。

(3) *FVC* 与各环境因子关系不同,主要表现为 *FVC* 与降水、相对湿度多呈正相关且相关区域有较好重叠性,包括都兰以东低山区和西南昆仑山区等植被覆盖相对较高的地区;*FVC* 与温度关系不明显;*FVC* 与日照时数以负相关为主,主要分布在西南昆仑山区、大柴旦以东等日照相对较少的区域;其中降水因子对 *FVC* 贡献高于其他气候因子。

(4) *FVC* 与蒸散量以负相关为主,集中在大柴旦—德令哈以北森林草原区、都兰以东草原区以及西南昆仑山荒漠草原区,温度、降水很大程度影响蒸散量与 *FVC* 关系,其中温度对蒸散量的影响大于降水,它们综合影响的土壤蒸发对蒸散量的影响远大于植物蒸腾。

(5) *FVC* 与海拔的空间分布有较好的吻合性,*FVC* < 10% 区域基本与 3 500 m 和 4 600 m 等高线重合,3 500 ~ 4 000 m 区域内 *FVC* 在 10% ~ 20%,植被垂直分异明显;并且二者具有较好的线性关系,海拔在 2 800 ~ 2 900 m 和 4 600 ~ 4 700 m 处出现两个峰值。

参考文献(References)

[1] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(9):1255 - 1268. [MU Shaojie, LI Jianlong, CHEN Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010[J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(9):1255 - 1268.]

[2] 陈效逑,王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报,2009,64(1):84 - 94. [CHEN Xiaoqiu, WANG Heng. Spatial and temporal variations of vegetation belts and vegetation cover degrees in Inner Mongolia from 1982 to 2003[J]. Acta Geographica Sinica,2009,64(1):84 - 94.]

[3] 朱会利,杨改河,韩磊. 延安市退耕过程植被覆盖度变化及其影响因子分析[J]. 农业机械学报,2015,46(8):272 - 280. [ZHU Huili, YANG Gaihe, HAN Lei. Analysis of fractional vegetation coverage changes and its influence factors during farmland returned to forest period in Yan'an City[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 272 - 280.]

[4] 张戈丽,徐兴良,周才平,等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报,2011,66(1):47 - 58. [ZHANG Geli, XU Xingliang, ZHOU Caiping, et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir Grassland in past 30 years[J]. Acta Geographica Sinica,2011,66(1):47 - 58.]

[5] 贾坤,姚云军,魏香琴,等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(7):774 - 782. [JIA Kun, YAO Yunjun, WEI Xiangqin, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2013,28(7):774 - 782.]

[6] 徐浩杰,杨太保. 柴达木盆地植被生长时空变化特征及其对气候要素的响应[J]. 自然资源学报,2014,29(3):398 - 409. [XU Haojie, YANG Taibao. Spatial-temporal variations of vegetation activities and its responses to climatic factors in the Qaidam Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 398 - 409.]

[7] 王顺利,王荣新,敬文茂,等. 祁连山干旱山地草地生物量对水分条件的响应[J]. 干旱区地理,2017,40(4):772 - 779. [WANG Shunli, WANG Rongxin, JING Wenmao, et al. Biomass of grassland and response to soil moisture on arid mountain land in the Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(4): 772 - 779.]

[8] 罗玲,王宗明,宋开山,等. 1982—2003 年中国东北地区不同类型植被 NDVI 与气候因子的关系研究[J]. 西北植物学报,2009,29(4):800 - 808. [LUO Ling, WANG Zongming, SONG Kaishan, et al. Research on the correlation between NDVI and climatic factors of different vegetation in the Northeast China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(4): 800 - 808.]

[9] 崔林丽,史军,杨引明,等. 中国东部植被 NDVI 对温度和降水的旬响应特征[J]. 地理学报,2009,64(7):850 - 860. [CUI Linli, SHI Jun, YANG Yinming, et al. Ten-day response of vegetation NDVI to the variations of temperature and precipitation in Eastern China[J]. Acta Geographica Sinica,2009,64(7):850 - 860.]

[10] 徐兴奎,陈红,LEVY J K. 气候变暖背景下青藏高原植被覆盖

特征的时空变化及其成因分析[J]. 科学通报,2008,53(4):456－462. [XU Xingkui,CHEN Hong,LEVY J K. Spatiotemporal vegetation cover variations in the Qinghai-Tibet Plateau under global climate change[J]. Chinese Science Bulletin,2008,53(6):915－922.]

[11] FU Y,CHEN H,NIU H H,et al. Spatial and temporal variation of vegetation phenology and its response to climate changes in Qaidam Basin from 2000 to 2015[J]. Journal of Geographical Sciences,2018,28(4):400－414.

[12] 杨元合,朴世龙. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报,2006,30(1):1－8. [YANG Yuanhe,PIAO Shilong. Variations in grassland vegetation cover in relation to climatic factors on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Plant Ecology,2006,30(1):1－8.]

[13] 刘纪远,徐新良,邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. 地理学报,2008,18(4):364－376. [LIU Jiyuan,XU Xinliang,SHAO Quanqin. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River headwaters region in Qinghai Province[J]. Acta Geographica Sinica,2008,63(4):364－376.]

[14] 丁明军,张镱锂,刘林山,等. 1982—2009 年青藏高原草地覆盖度时空变化特征[J]. 自然资源学报,2010,25(12):2114－2122. [DING Mingjun,ZHANG Yili,LIU Linshan,et al. Temporal and spatial distribution of grassland coverage change in Tibetan Plateau since 1982[J]. Journal of Natural Resources,2010,25(12):2114－2122.]

[15] 梁四海,陈江,金晓媚,等. 近 21 年青藏高原植被覆盖变化规律[J]. 地球科学进展,2007,22(1):33－40. [LIANG Sihai,CHEN Jiang,JIN Xiaomei,et al. Regularity of vegetation coverage changes in the Tibetan Plateau over the last 21 years[J]. Advances in Earth Science,2007,22(1):33－40.]

[16] JIAPAER G,CHEN X,BAO A M. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions[J]. Agricultural & Forest Meteorology,2011,151(12):1698－1710.

[17] 刘园,王颖,杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. 生态学报,2010,30(4):923－932. [LIU Yuan,WANG Ying,YANG Xiaoguang. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(4):923－932.]

[18] 高歌,陈德亮,任国玉,等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究,2006,25(3):378－387. [GAO Ge,CHEN Deliang,REN Guoyu,et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J] Geographical Research,2006,25(3):378－387.]

[19] YIN Y H,WU S H,ZHENG D,et al. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China[J]. Agricultural Water Management,2008,95(1):77－84.

[20] ZHOU L M,TUCKER C J,KAUFMAN R K,et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2001,106(D17):20069－20084.

[21] FANG J Y,PIAO S L,HE J S,et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China,1982—1999[J]. Science in China Series C Life Sciences,2004,47(3):229－240.

[22] 高清竹,李玉娥,林而达,等. 藏北地区草地退化的时空分布特征[J]. 地理学报,2005,60(6):965－973. [GAO Qingzhu,LI Yu'e,LIN Er'da,et al. Temporal and spatial distribution of grassland degradation in Northern Tibet[J]. Acta Geographica Sinica,2005,60(6):965－973.]

[23] 朱文彬,吕爱锋,贾绍凤. 基于 NDVI 的柴达木盆地植被空间分异规律及影响因素[J]. 干旱区研究,2010,27(5):691－698. [ZHU Wenbin,LYU Aifeng,JIA Shaofeng. Study on spatial distribution of vegetation coverage and its affecting factors in the Qaidam Basin based on NDVI[J]. Arid Zone Research,2010,27(5):691－698.]

[24] 张学珍,戴君虎,葛全胜. 1982—2006 年中国东部春季植被变化的区域差异[J]. 地理学报,2012,67(1):53－61. [ZHANG Xuezhen,DAI Junhu,GE Quansheng. Spatial differences of changes in spring vegetation activities across Eastern China during 1982—2006[J]. Acta Geographica Sinica,2012,67(1):53－61.]

Spatial and temporal variation of fractional vegetation cover and its relationship with environmental factors in the Qaidam Basin during 2000—2015

ZHANG Si-qi[1], CHEN Hui[1], SONG Ming-hua[2], FU Yang[1], NIU Hui-hui[1], YANG Yi[1], ZHANG Bo-xiong

(1 *College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang* 050024, *Hebei, China*; 2 *Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

Abstract: The relationship between fractional vegetation cover and environmental factors is one of the important contents for the study of the ecosystem in arid regions. In this paper, we analyzed the temporal and spatial variation characteristics of fractional vegetation cover from 2000 to 2015 in the Qaidam Basin, Qinghai Province, China based on MODIS-*NDVI*. Combined with DEM data and meteorological data of the basin, the correlation analysis, partial correlation analysis or overlay analysis between fractional vegetation cover and precipitation, temperature, sunshine duration, relative humidity, evapotranspiration, and altitude were calculated to explore the response characteristics of fractional vegetation cover to major environmental factors. The results showed that the fractional vegetation cover in the Qaidam Basin displayed a semi-annular decreasing trend from the southeast to the northwest. The overall fractional vegetation cover was below 20%. The human activities and the distribution of runoff broke the regularity of vegetation zonal distribution and thus affected fractional vegetation cover significantly. In the context of global warming, the fractional vegetation cover was increased significantly during the time period from 2000 to 2015, with most of the regions being widely distributed in the central and western and parts of the eastern mountainous region of the basin. Furthermore, the most obvious inter-annual variation occurred from 2001 to 2002. Especially the improvement trend of forest, grassland and meadow vegetation was particularly obvious. The relationship between fractional vegetation cover and different meteorological elements was different. The fractional vegetation cover was positively correlated with precipitation and relative humidity, and negatively correlated with sunshine hours and evapotranspiration. The relationship between fractional vegetation cover and temperature was not significant. Among them, the precipitation contributed the most to the fractional vegetation cover and was the major limiting factor to affect the growth of vegetation in the basin. Temperature indirectly affected fractional vegetation cover by affecting evapotranspiration, and contributed more to evapotranspiration than precipitation. Meanwhile, the influence of soil evaporation to evapotranspiration was much higher than that of vegetation transpiration. There was consistency of the spatial distribution between fractional vegetation cover and altitude, which meant that fractional vegetation cover had a good consistency with the spatial distribution of contour lines. Vegetation vertical differentiation was evident. Two peak values occurred in the areas of 2 800 – 2 900 m and 4 600 – 4 700 m respectively due to the influence of water source and temperature, while fractional vegetation cover was decreased rapidly above 4 700 m. This paper clarifies the relationship between multiple environmental factors and fractional vegetation cover, and makes clear the response characteristics of vegetation to major environmental factors under the background of global warming and drying, which has a great significance for the study of other ecological environment and climate change in arid regions.

Key words: fractional vegetation cover; inter-annual variation; environmental factor; correlation analysis